

Kıvrımlar

Biyolojik sistemlerde metabolik gereksinimlerin karşılanabilmesi için bazen çok geniş yüzeylere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla hücre veya organelin hacmi fazla artırılmadan, yüzey alanı kıvrımlarla istenilen oranda artırılmıştır. Besinlerin sindirilebilmesi için çok geniş bir yüzeye ihtiyaç duyulan ince bağırsağın iç yüzeyi kıvrımlı yapıdan dolayı yaklaşık bir tenis kortunun alanına sahiptir. Benzer şekilde kıvrımlı bir yapıda olan mitokondrinin iç membranında yaklaşık 10.000 kadar elektron transportunu ve ATP üretimini sağlayan solunum zincirleri bulunmaktadır. Bilinen geometrik şekillerin aksine, uyum ve esneklik için eşsiz bir önemi olan kıvrımlar sadece tıp ve biyolojik sistemlerle sınırlı olmayıp bilimin tüm alanlarında karşımıza çıkar.



Antik Yunan filozofları da düzgün geometrik şekilleri çok seviyorlardı, çünkü onlara göre bu şekiller kusursuzdu. Aslında ilk dönemlerde bu kusursuzluk mantığıyla o kadar iyi sonuçlar elde ettiler ki bu sonuçlara modern bilim ancak binlerce yıl sonra ulaşabildi. MÖ 240 yılında İskenderiye Kütüphanesi'nin yöneticisi Eratostenes güneş ışınlarının 21 Haziran günü öğle vaktinde Mısır'ın Syene kentine dik düştüğü halde yaklaşık 800 km kuzeydeki İskenderiye'ye neden dik düşmediğini araştırmaya koyuldu. Eratostenes o zamanın son derece kısıtlı ölçüm imkânlarına rağmen yürüttüğü kusursuzluk mantığıyla bu farkın dünyanın küre şeklinde olmasından kaynaklandığını ileri sürdü. Buradan yola çıkan Eratostenes iki kent arasındaki mesafe ve gölgelerin uzunluğunu kullanarak dünyanın çapını yaklaşık 13.000 km ve çevresini de 40.000 km olarak hesaplamayı başardı. Bunlarla yetinmeyen bir diğer Antik Yunan Filozofu İznikli Hipparkus Dünya ile Ay arasındaki mesafeyi de bugünkü değere çok yakın olarak ölçmeyi başardı. Bulduğu değer Yerküre'nin çapının 30 katı kadardı, yani o zamanki verilere göre bu 386.000 km olmalıydı.

Medeniyetin başladığı ilk dönemlerde insanlar kıvrımlar yerine daha çok düzgün şekillerle ilgilenmişlerdir. Çünkü bu şekillerle işlem yapmak, elde edilen sonuçları genellemek daha kolaydı. Matematikte ilk öğrendiğimiz geometrik kavramlar da doğru, düzlem, çember, daire, küre, küp vb. gibi belli özellikleri olan kusursuz yapılarıdır. Ancak tüm doğa olaylarını bu geometrik şekillerle açıklamak da mümkün değil.

Tüm bu başarıların 2000 yıl öncesine ait olduğunu unutmamalıyım. Bu eşsiz başarılarına rağmen Yunanlı Filozofları ciddi bir tehlike bekliyordu. Yunanlılar kusursuzluğu o kadar ileri bir noktaya götürdüler ki sonunda gerçek dünya ile neredeyse bağlarını kopardılar. Gökyüzünün kusur-

suz olmasına karşın Dünya Pandora'nın kutusunun açılışından bu yana kötülüklerin, günahların olduğu bir yer olarak kabul ediliyordu. Bu durum Yunanlıların gerçek hayatla bağlarının zayıflamasına ve sonunda Yunan medeniyetinin de sonunun hazırlanmasına neden olacaktı. Eğer Antik Çağ Filozofları yeryüzünü oluşturan dağları, tepeleri, ovaları, vadileri, kısaca kıvrımlı yapıları dikkate alıp, dünyanın da bir gök cismi olduğunu hesaba katmış olsalardı belki bu hataya düşmeyeceklerdi.

Yeryüzünü şekillendiren yapıların var olmadığını, her tarafın ova olduğunu ve Dünya'nın pürüzsüz bir küre şeklinde olduğunu düşündüğümüzde tamamen sularla kaplı ve karanın olmadığı bir gezegen görüntüsüyle karşılaşırız. İşte, yeryüzünün şekillenmesinde önemli rol oynayarak yaşamın sürdürülebilir olmasını sağlayan kıvrımlar aynı zamanda yapısal uyumun da vazgeçilmez unsurlarından biri olmuştur.

Kıvrımlar mühendislikte, özellikle yüzey-hacim oranı problemlerinin aşılmasında başvurulan önemli yollardan biridir. Örneğin hava soğutmalı motorlarda motorun yüzey alanı, motorun soğutulması için yeterli olmamaktadır. Bu nedenle motorun hacmi artırılmadan kıvrımlarla yüzey alanı artırılarak sıcaklığın daha geniş bir yüzeye yayılması sağlanır. Böylece vantilatörle sağlanan hava dolaşımıyla etkili bir soğutma sağlanmış olur.

Jeofizikçiler, jeologlar, makine mühendisleri gibi farklı disiplinlerde çalışan bilim insanları kıvrımlarla ilgili araştırmalar yapmaktadır. Bizse bu yazıda kıvrımların mühendislik, jeolojik veya coğrafi anlamlarıyla yetinmeyip özellikle biyolojik sistemlerde ne kadar önemli roller üstlendiğine bakalım.

Yaşamın sürdürülebilir olmasını sağlayan en temel özelliklerden biri de organizmaları oluşturan temel yapıların salt geometrik değil, esnek ve birbiriyile uyumlu olmalarıdır. Bu uyumda hücre ve doku yüzeylerindeki kıvrımlar önemli rol oynar. Kıvrımlar uyum için olduğu kadar yüzey hacim orantısızlığı-

nın olduğu durumlarda da ön plana çıkar. Çünkü biyolojik sistemlerde bir yapının işlevi ve büyüklüğü arasında sıkı bir ilişki vardır. Neden dev hücrelerin bulunmadığını, örneğin misket büyüklüğünde hücrelerle neden karşılaşmadığımızı sorabiliriz. Bu durum uzunluk, yüzey alanı ve hacim gibi geometrik büyüklükler ile cisimlerin şekli arasındaki ilişkiyle açıklanabilir. Düzgün yapıli cisimlerin yüzey alanlarıyla hacimlerindeki artışı oranladığımızda her zaman hacimdeki artışın yüzey alandan daha fazla olduğunu görürüz. Örneğin kenar uzunluğu 1 birim olan bir küpün kenar uzunluğu iki katına çıkarıldığı zaman alanı 4 ve hacmi de 8 kat artar. Bu özellik tüm benzer cisimler için geçerlidir. Benzer şekilde hücreler de büyüdükçe (hücrenin yuvarlak olduğu varsayılmıştır) hacimleri yarıçaplarının küpüyle (r^3) yüzey alanları da yarıçaplarının karesiyle (r^2) orantılı olarak artmaktadır.



İnce bağırsak kesiti

Organizmada çevreden sinyal alımı veya madde alışverişi gibi bazı fiziksel özellikler hücrenin yüzey alanına bağlı iken bazıları da hacme bağlıdır. İşte bu iki büyüklük arasındaki oran yapının büyüklüğünü belirlemede önemli rol oynar. Bu durum küçük hacimlerde önemli olmayabilir, ancak hücrenin boyutlarında artış olduğu zaman ciddi problemler yaratabilir. Çünkü hücre belli bir büyüklüğe ulaştığında yüzey alanı metabolik ihtiyaçlarını karşılamaya yetmez. Bu durumda hücrenin iki seçeneği vardır: Büyümenin durdurulması veya bölünmesi.

Buraya kadar her şey yolunda, ancak bazen hacimde önemli bir artış olmaksızın hücrenin büyük bir yüzey alanına gerek duyduğu durumlar olabilir. Çok sayıda farklı işlemin belli bir hacimde olması gerektiği biyolojik sistemlerde bu problem farklı yöntemlerle aşılmıştır. Bu yöntemlerin başında kıvrımlar gelir. Biyolojik sistemlerde çok sayıda kıvrım bulunmakla birlikte özellikle üç tanesi farklı özellikleriyle ilgi çeker. Bağırsaklarda besinlerin emiliminden sorumlu kıvrımlar, mitokondrilerde elektron transport işlemini yürüten matriksteki kıvrımlar ve beyin yüzeyindeki kıvrımlar.

İnce Bağırsak

İnce bağırsak ilk bakışta sadece esnek, boru şeklinde, sindirilmiş besinlerin taşınması ve emilimini sağlayan yapılar olarak düşünülebilir. Oysa daha yakından incelediğimiz zaman bağırsakların çok sayıda kimyasal maddeyi üreterek sindirim ve emilimin organizmanın ihtiyacına göre karşılanmasını sağlayan son derece kompleks yapılar olduğunu görürüz. İnce bağırsağın yaklaşık 5 metrelik bir uzunluğu vardır ve üç bölüme ayrılır.

Alınan besin maddeleri kural olarak temel yapıtaşlarına kadar parçalanır ve bu yapıtaşları daha sonra bağırsaklar tarafından emilir. Tıpkı evimize almış olduğumuz ve kapıdan girmesi mümkün olmayan gardırobun önceden parçalara ayrılıp içeri alınması ve sonra montajının yapılmasında olduğu gibi, alınan besinler de önce bağırsakta parçalanır ve daha sonra emilir. Emilen besinlerin bir kısmı dolaşıma geçmeden önce ince bağırsak epitel hücrelerinde yeniden sentezlenerek özel yapılar içinde dolaşıma gönderilir. Besinlerle alınan protein, karbonhidrat ve yağların temel yapıtaşları olan amino asitler, monosakkaritler ve yağların bileşenleri, emilip kana karıştıktan sonra organizmanın ihtiyacı olan çok farklı protein, karbonhidrat ve yağlara dönüştürülür.

Besinlerin kısa zamanda emiliminin sağlanması için oldukça geniş bir yüzey-

ye ihtiyaç duyulur. Çünkü alınan besinlerin içeriği çok farklılık gösterir. Bunlar karbohidratlar, proteinler, yağlar, mineraller, vitaminler ve çok sayıda diğer bileşikler içerirler. Bağırsağın yüzey alanını salt silindir biçiminde artırmak hem anatomik hem de fizyolojik olarak mümkün değildir. Ancak bağırsak yüzeyinde bulunan kıvrımlar sayesinde emilim bölgesinin alanı son derecede artırılarak besinlerin kolayca emilmesi sağlanmış olur.

İnce bağırsakta sadece emilimi sağlayan hücreler bulunmaz, aynı zamanda sindirimin kontrollü bir şekilde gerçekleşebilmesi için çok sayıda farklı hormon üreten hücreler de bulunmaktadır. Burada üretilen hormonlar safra kesesinin kasılması, pankreasta sindirimi sağlayan enzimlerin ve bağırsak içeriği pH'sını düzenleyen bikarbonatça zengin sıvıların salınımı, mide ve bağırsak hareketlerinin kontrolü, insülin salınımı gibi çok sayıda metabolik olayı da kontrol ederler.

İnce bağırsak mukozası incelendiğinde yüzey alanını artıran kıvrımlarla karşılaşılır. İnce bağırsakta çok sayıda yakınlaşan valvül (Kerckring kıvrımları) bulunmaktadır. Bu kıvrımlar dairesel şekilde uzanarak yüzey alanını yaklaşık 3 kat artırır. Bununla beraber ince bağırsakta bulunan milyonlarca villus da emilim yüzeyini bir 10 kat daha artırır. Villusları oluşturan epitel hücreleri arasında goblet hücreleri, hormon salgılayan

hücreler, kök hücreler ve farklı görevleri olan diğer hücreler yer alır. Goblet hücreleri glikoprotein yapıda bileşikler salgılayarak bağırsak yüzeyini korur.

Villusların yüzeyinde bulunan epitel hücrelerinin ince bağırsak lümenine bakan kısmında her hücreden yaklaşık 1.000 kadar mikrovillus bulunur. Bu yapı bağırsak içeriğiyle karşılaşan yüzey alanını yaklaşık 20 kat daha artırır. Böylece Kerckring kıvrımları, villus ve mikrovilluslarla ince bağırsak emilim yüzeyi yaklaşık 250 m² olur ki bir tenis kortunun alanı da bu kadardır. Bu mikrovilluslar sadece emilim yapan pasif yapılar değildir. Mikrovillusların içinde paralel olarak uzayan birçok aktin flamenti mikrovilluslara sürekli hareket yaptırarak daha çok sıvıyla teması sağlar ve emilimi artırır.

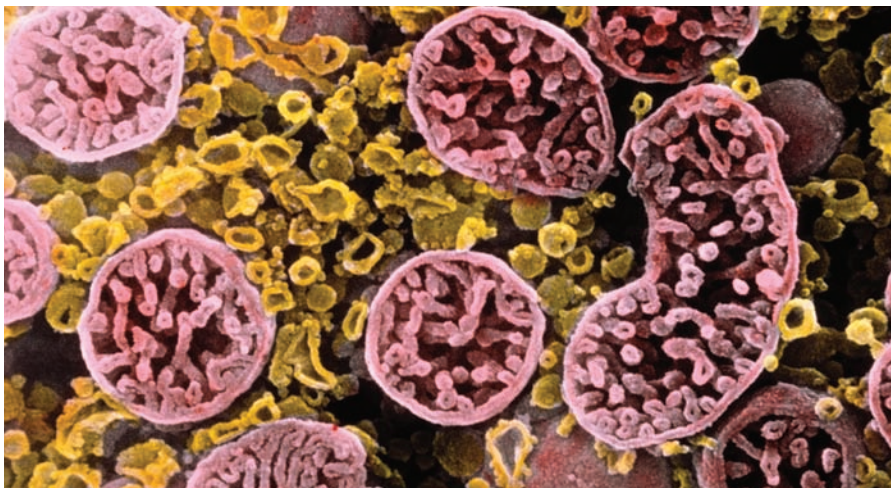
Mitokondriler

Dünyanın önemli problemleri arasında enerji sıkıntısının ilk sıralarda geldiğini tahmin etmek güç değildir. Oysa biyolojik sistemlerde enerji üretimi organizmanın ihtiyacına göre son derece esnek ve verimli bir şekilde devam etmektedir. Her hücre kendi enerjisini kendisi üretir. Hücreler enerji hammaddelerini dışarıdan alırlar ve enerjilerini ihtiyaçlarına göre üretirler. Her hücre tipinin tükettiği enerji miktarı farklı olduğundan hücrelerde bulunan enerji üreten merkezlerin sayısı da fark-

lı olacaktır. Hücrelerde enerji üreten en önemli merkez mitokondrilerdir. Mitokondrisi olmayan eritrositler gibi hücreler enerji ihtiyaçlarını glikolizle (glikozun laktata parçalanmasıyla son bulan ve her glikoz molekülünün yıkımıyla net 2 ATP'nin elde edildiği metabolik yol) karşılar. Mitokondrisi olan hücrelerde glikolizle (glikozun pirüvata parçalanmasıyla son bulan ve her glikoz molekülünün yıkımıyla net 2 ATP ve 2 NADH'nın elde edildiği metabolik yol) elde edilen enerji miktarı son derece düşük olup enerjinin temel üretim yeri mitokondrilerdir. Yetişkin bir insanın günlük ATP ihtiyacı aktivitesine göre ortalama 50-80 kg kadardır. Evet yanlış okumadınız 50-80 kg. Oysa herhangi bir anda hücrede bulunan ATP miktarı son derece düşüktür. Bu iki veriyi birleştirdiğimizde ATP'nin ihtiyaca göre sürekli üretiliyor olması gerektiği sonucunu çıkarabiliriz. Bu nedenle mitokondriler maksimum enerji üretecek şekilde organize olmuşlardır.

Diğer hücre içi organellerden farklı olarak mitokondrilerin iki membranı bulunur. Dış membran birçok bileşiğe geçirgen olup kıvrım içermemektedir. İç membran ise kıvrımlarıyla çok farklı bir yapıya sahiptir. İki membran arasındaki boşluk enerji üretiminde son derece önemli rol oynar. Mitokondrilerde elektron iletiminden sorumlu çok sayıda birim vardır. Solunum zincirini oluşturan bu birimlere kompleks adı verilmektedir ve 1 den 5'e kadar sıralanırlar (Kompleks 1-5). Tipik bir karaciğer hücresinde her bir mitokondrinin iç membranında bu solunum zincirlerinden 10.000 (on bin) kadar bulunabilmektedir. Kompleks 5 dışında diğer kompleksler elektron akışını sağlar. Bu dört kompleksden 3'ü (kompleks 2 hariç) aynı zamanda pompa görevlerini de üstlenmişlerdir. Yani bu komplekslerden elektronlar geçerken elde edilen enerji protonların membranlar arasındaki boşluğa pompalanmasını sağlar. Sonuçta mitokondri iç membranının iki yüzeyi arasında potansiyel fark meydana gelecektir. Ne kadar çok kompleks varsa o kadar çok proton

Hücre organellerinin elektron mikroskobu görüntüsü



membranlar arası boşluğa pompalanacak ve o kadar potansiyel fark elde edilecektir. Mitokondri gibi hücre içinde bulunan ve bazen sayıları çok fazla olabilen küçük yapıları daha fazla kompleks içermeleri için fazla büyütme mümkün olmayacaktır. İşte tam bu noktada kıvrımlar devreye girerek mükemmel bir çözüm sağlar. Mitokondri iç membranındaki kıvrımlar sayesinde çok sayıda kompleks mitokondri içine yerleştirilerek, hacim artışı olmadan bol miktarda enerji elde edilmiş olur.

Dünyada tüketilen elektrik enerjisi ihtiyacının yaklaşık %25'ini sağlayan dev hidroelektrik santralleri oluşturan birimlerle hücre içi yapılar olan mitokondri birimleri arasında ilginç benzerlikler bulunmaktadır. Mitokondrideki iki membran arası boşluk hidroelektrik santrallerde suyun biriktiği baraj alanı gibi düşünülebilir. Hidroelektrik santrallerde su baraj gölünde toplanırken, mitokondride protonlar membranlar arası alanda toplanır. Hidroelektrik santrallerin baraj alanında biriken su, akarsularla veya yağmur ve kar sularıyla taşınırken, mitokondride protonlar pompalarla (kompleks 1, 3 ve 4) membranlar arası boşluğa itilir. Hidroelektrik santrallerde suyun baraj alanında birikmesi için gerekli enerji güneşten sağlanırken, mitokondride NADH ve FADH₂ gibi yapılardan elektronların oksijene akışı sırasında elde edilir. Hidroelektrik santrallerde elektrik enerjisi üretimi için suyun çevirdiği türbin jeneratördeki mıknatısları çevirir. Benzer şekilde mitokondride kompleks 5 olarak bilinen ve ATP üretiminden sorumlu olan birimlerde, protonların kompleksteki kanaldan geçerken kompleksin F1 olarak bilinen kısmında dönmeye neden olduğu ve bu dönme hareketi sonucu ADP ve P'den ATP üretildiği bilinmektedir.

Aradaki en büyük fark hidroelektrik santrallerde elektrik enerjisi üretilirken, mitokondride ATP şeklinde kimyasal enerji üretilmesidir. Üretilen ATP organizmanın ihtiyaç duyduğu mekanik, elektrik, ısı gibi enerji biçimlerine çevrilebilmektedir.



Shutterstock

Beyin

Beyin yüzeyini oluşturan serebral korteksin asıl işlevsel bölümü, tüm serebrumu kaplayan 2-4 mm kalınlığında bir tabakadır. Bu ince tabaka da kendi içinde 6 alt tabakadan oluşur. Her bir alt tabakanın özel işlevleri bulunmaktadır. Örneğin beyin sapı ve omuriliğe giden lifler çoğunlukla 5. tabakadan doğar, talamusa giden liflerin çoğunluğu da 6. tabakadan çıkar. Serebral korteks tek başına izole bir yapıya sahip olmayıp sinir sisteminin diğer yapılarıyla anatomik ve işlevsel bir bütünlük oluşturur. Yarım küre şeklinde düşünülebilen serebral korteksin yüzey alanı yaklaşık 0.25 m²'dir (2500 cm²) ve kafatasının içine sığabilmesi için kıvrımlı bir yapıya sahiptir. Serebral korteksin her bir bölgesinin belirli işlevleri bulunmaktadır ve bu işlevleri gösteren haritalar çıkarılmıştır. Bu bölgelerde meydana gelen lezyonlar ilgili işlevin kaybına neden olur. Serebral korteksin her bir yarım küresinde frontal, parietal, oksipital, temporal, insular ve limbik olmak üzere 6 lob bulunur. Bu loblarla motor, duyuşsal, kognitif vb. işlevler gerçekleşir.

Sonuç olarak kıvrımlar biyolojik sistemlerde kompleks moleküler yapılardan organellere ve hücrelerden doku ve organlara kadar her düzeyde görülür. Kıvrımlar sayesinde çok küçük bir bölgede oldukça uzun veya geniş olan kompleks yapılar belirli kurullarla yerleştirilmiş, hacim fazla artırılmadan yüzey alanı kat kat genişletilerek hücrenin metabolik ihtiyaçları karşılanmış ve doku ve organların anatomik uyumları sağlanmıştır. Bu özellikler sadece ince bağırsak, mitokondri ve beyinle sınırlı olmayıp organizmada hemen her alanda görülebilir.

Kaynaklar

1. Asimov, I., *Bilim Rehberi*, E yayınları, 1986.
2. Allan, H. C., *Physics for The Life Sciences*, 2. Basım, McGraw Hill, New York, 1977.
3. Arthur, C. G. ve John, E. H., *Textbook of Medical Physiology*, W. B. Saunders Company, Philadelphia, 1996.
4. Stephen, G. W., *Correlative Neuroanatomy*, Lange Medical Books/McGraw-Hill, New York, 2000.